

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 12.03.02 Опотехника
Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Оптические свойства трехмерных плазмонных структур, изготовленных методом двухфотонной полимеризации

УДК: 004.925.84:66.095.26.085.3/.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Чашин Владимир Вениаминович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шеремет Е. С.	PhD		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Маланина В. А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООТД ШБИП	Черемискина М. С.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов С. А.	к.ф.-м.н.		

Томск – 2021г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код	Результат освоения ООП
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной форме на государственном и иностранном (-ых) языке
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этническом и философском контекстах
УК(У)-6	способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течении сей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики
ОПК(У)-2	Способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения физико-математический аппарат
ОПК(У)-4	Способность учитывать современные тенденции развития техники и технологий в своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-5	Способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований
ОПК(У)-6	Способность собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования
ОПК(У)-7	Способность использовать современные программные средства подготовки конструкторско-технологической документации
ОПК(У)-8	Способность использовать нормативные документы в своей деятельности
ОПК(У)-9	Способность владеть методами информационных технологий, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность к математическому моделированию процессов и объектов оптотехники и их исследованию на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов

ПК(У)-2	Способность к проведению экспериментальных измерений оптических, фотометрических и электрических величин и исследования различных объектов по заданной методике
ПК(У)-3	Готовность формировать презентации, научно-технические отчеты по результатам выполненной работы, оформлять результаты исследований в виде статей и докладов па научно-технических конференциях
ПК(У)-4	Способность к наладке, настройке, юстировке и опытной проверке оптических, оптико-электронных приборов и систем
ПК(У)-5	Способность к анализу, расчету, проектированию и конструированию в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов оптотехники на схемотехническом и элементном уровнях
ПК(У)-6	Способность к оценке технологичности и технологическому контролю простых и средней сложности конструкторских решений, разработке типовых процессов контроля параметров механических, оптических и оптико-электронных деталей и узлов
ПК(У)-7	Способность к участию в монтаже, наладке настройке, юстировке, испытаниях, сдаче в эксплуатацию опытных образцов, сервисном обслуживании и ремонте оптической техники
ПК(У)-8	Способность к расчету норм выработки, технологических нормативов на расход материалов, заготовок, инструмента, выбору типового оборудования, предварительной оценке экономической эффективности техпроцессов
ПК(У)-9	Способность к разработке технических заданий на конструирование отдельных узлов приспособлений, оснастки и специального оборудования, предусмотренных технологией
ПК(У)-10	Способность к участию в работах по доводке и освоению техпроцессов в ходе технологической подготовки производства оптических и оптико-электронных приборов
ПК(У)-11	Способность к организации входного контроля материалов и комплектующих изделий
ПК(У)-12	Способность к внедрению технологических процессов производства, метрологического обеспечения и контроля качества оптических и оптико-электронных приборов и их элементов

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 Опототехника
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Степанов С.А.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4B71	Чащину Владимиру Вениаминовичу

Тема работы:

Оптические свойства трехмерных плазмонных структур, изготовленных методом двухфотонной полимеризации	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования: трехмерные полимерные структуры, изготовленные методом двухфотонной поляризации, функционализированные плазмонными наночастицами (предоставлены УТТ, Франция) Методы исследования: спектрофотометрия, численное моделирование электромагнитных полей с помощью COMSOL Multiphysics, Рамановская спектроскопия.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<ul style="list-style-type: none"> Обзор литературы с целью ознакомления с основными эффектами, определяющими оптические свойства структур (оптические свойства полимеров, плазмонных наночастиц, теория Ми, оптическая интерференция, фотонные кристаллы, матрица пропускания, понятия ближнего и дальнего полей) Определение методологии моделирования (в т.ч. бенчмаркинг), постановки экспериментов Получение результатов (расчетных и экспериментальных оптических спектров, спектров комбинационного рассеяния) и их анализ (сопоставление спектров с учетом ближнепольных и дальнепольных эффектов) Заключение по работе
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Микроскопические (оптические и электронные) изображения структуры 3D модель с сеткой Спектры (расчетные и экспериментальные) Спектры комбинационного рассеяния
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Маланина Вероника Анатольевна, доцент ОСГН ШБИП ТПУ</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Черемискина Мария Сергеевна, ассистент ООТД ШБИП</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>01.10.2020 г.</p>
---	----------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Шеремет Евгения Сергеевна	PhD		10.10.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B71	Чащин Владимир Вениаминович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4В71	Чащину Владимиру Вениаминовичу

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	12.03.02 Опотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	В исследовании задействовано два человека: руководитель проекта и студент. Исследования проводились на оборудовании Научного парка НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы длительности рабочего дня, выполнения исследования
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления по страховым взносам 30,2% от ФОТ
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	SWOT-анализ позволит провести оценку потенциала и перспективности реализации представленного научно-исследовательского проекта.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Формирование плана и графика разработки научного исследования: определение контрольных событий проекта; разработка графика Ганта. Формирование бюджета НИ: материальные затраты; заработная плата (основная и дополнительная); отчисления на социальные нужды; накладные расходы.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	- Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности проекта; - Расчет экономической эффективности проекта.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Альтернативы проведения НИ 4. График проведения и бюджет НИ 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Чащин Владимир Вениаминович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4В71	Чащину Владимиру Вениаминовичу

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	12.03.02 Опототехника

Тема ВКР:

Оптические свойства трехмерных плазмонных структур, изготовленных методом двухфотонной полимеризации
--

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: трехмерные полимерные структуры, изготовленные методом двухфотонной поляризации, функционализированные плазмонными наночастицами (предоставлены УТТ, Франция)</p> <p>Методы исследования: спектрофотометрия, численное моделирование электромагнитных полей с помощью COMSOL Multiphysics, Рамановская спектроскопия.</p>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <p>специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>"Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019) ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p>
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Зрительное напряжение на рабочем месте;</p> <p>Отклонение показателей микроклимата в помещении;</p> <p>Недостаточная освещенность рабочей зоны;</p> <p>Нервно-психические перегрузки;</p> <p>Поражение электрическим током.</p>
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>Атмосфера: выброс газообразных отходов, парниковых газов;</p> <p>Гидросфера: загрязнение водных источников химическими веществами;</p> <p>Литосфера: загрязнение почвы компьютерными отходами.</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p>	<p>Возможные ЧС: пожар, наводнение, землетрясение, аварии на коммунальных станциях. Наиболее типичная ЧС: пожар.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Чащин Владимир Вениаминович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 85 с., 38 рис., 18 табл., 29 источников.

Ключевые слова: плазмонные частицы, Рамановская спектроскопия, численное моделирование, поверхностный резонанс, полимерные структуры, фотонный кристалл.

Объектом исследования являются трехмерные плазмонных структур, изготовленные методом двухфотонной полимеризации.

Цель работы – исследовать оптические свойства трехмерных плазмонных структур, изготовленных методом двухфотонной полимеризации.

В процессе исследования проводись: сбор, обработка и систематизация литературных данных по представленной теме, расчет необходимых физических моделей методом конечных элементов, экспериментальное исследование образцов при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния.

В результате исследования показано влияние трехмерной плазмонной подложки на снимаемый спектр комбинационного рассеяния.

Область применения: использование в качестве усиливающих подложек при проведении поверхностно-усиленной Рамановской спектроскопии.

Нормативные ссылки

Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. От 09.03.2021)

ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

СП 2.2.3670-20. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда

СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.

ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

Федеральный закон от 04.05.1999 г. №96-ФЗ. Об охране атмосферного воздуха.

ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.

ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов.

ГОСТ 12.1.004-91. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

Определения, обозначения, сокращения

ПНЧ – плазмонная наночастица

ППР – поверхностный плазмонный резонанс

ЛППР – локализованный поверхностный плазмонный резонанс

ФК – фотонный кристалл

УФ – ультрафиолетовый

ИК – инфракрасный

ПЗС – прибор с зарядовой связью

4-NBT (4-nitrobenzenthioI) – 4-нитробензентиол

SEM (scanning electron microscopy) – сканирующая электронная микроскопия

RS (Raman spectroscopy) – Рамановская спектроскопия

SERS (surface-enhanced Raman spectroscopy) – поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия

WP (woodpile) – структура типа «поленница»

Оглавление

Введение.....	14
1. Обзор литературы.....	15
1.1. Оптические свойства полимеров.....	15
1.2. Оптические свойства плазмонных наночастиц	17
1.2.1. Плазмоны	17
1.2.2. Поверхностный плазмонный резонанс.....	19
1.2.3. Локализованный поверхностный плазмонный резонанс.....	22
1.3. Оптические свойства фотонных кристаллов.....	23
1.3.1. Фотонные кристаллы.....	23
1.3.2. Фотонная зонная структура	25
1.3.3. Дефекты структуры фотонного кристалла.....	27
1.4. Спектроскопические методы исследования.....	28
1.4.1. Рамановская спектроскопия.....	28
1.4.2. Поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия	30
2. Объекты и методы исследования	34
2.1. Объекты исследования	34
2.2. Метод конечных элементов в COMSOL Multiphysics.....	36
2.3. Методы экспериментального исследования	38
3. Результаты и анализ	40
3.1. Расчет физических моделей в COMSOL Multiphysics	40
3.2. Рамановская спектроскопия.....	41
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	50

4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	50
4.1.1. Анализ конкурентных технических решений.....	50
4.1.2. SWOT анализ.....	52
4.2. Планирование научно-исследовательских работ	53
4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	53
4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	55
4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования.....	55
4.2.4. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	59
4.3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .	64
5. Социальная ответственность	68
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	68
5.1.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	68
5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	69
5.2. Производственная безопасность	70
5.2.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	70
5.2.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	71
5.2.3. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	75

5.3. Экологическая безопасность.....	77
5.3.1. Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду	77
5.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду....	78
5.3.3. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	78
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	79
5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	79
5.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	79
5.4.3. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	80
Список источников	83

Введение

Создание объемных микро- или наноструктур различных форм и упорядочивание их в различные массивы, состоящие из таких структур, в пространстве в настоящее время является сложной технологической задачей, решить которую могут лишь современные и высокотехнологические методы. К таким методам можно отнести лазерную двухфотонную полимеризацию – она же лазерная двухфотонная литография. Этот метод совмещает в себе одновременно математическое описание объекта и его формы и воплощение компьютерной модели этого объекта в реальной структуре [1].

Двухфотонная лазерная полимеризация является одним из немногих методов трехмерного структурирования с разрешением порядка нескольких десятков нанометров. Так же, важной особенностью двухфотонной полимеризации является локализация процесса полимеризации в фокальной области лазерного пучка, что увеличивает разрешающую способность данного метода. Кроме того, за счет большей зависимости размера области полимеризации от плотности энергии, в сравнении с однофотонным процессом, двухфотонная полимеризация позволяет уменьшить размер этой области. За счет двухфотонного поглощения жидким полимером внутри фокального объема этот метод позволяет структурировать этот полимер сразу в трех измерениях, что невозможно для однофотонных процессов. Структуры, изготавливаемые методом двухфотонной полимеризации, могут иметь сложные формы, будь то взаимопроникающие или нависающие структуры, которые в свою очередь могут быть очень востребованы в различных областях оптики, нанoeлектроники, микромеханики.

Целью данной работы является исследование оптических свойств трехмерных плазмонных структур, изготовленных методом двухфотонной полимеризации (предоставлены УТТ, Франция) с осажденными по объему наночастицами.

1. Обзор литературы

1.1. Оптические свойства полимеров

Фоторезисты – светочувствительные полимерные составы, устойчивые к воздействию агрессивных факторов. Фоторезистивные полимеры обладают как определенными оптическими свойствами, так и необходимыми резистивными свойствами, которые позволяют конкретному составу выдерживать последующее травление в агрессивных средах.

По такому параметру как поглощение падающего излучения и спектральным характеристикам чувствительности фоторезисты близки к фотоэмульсионным материалам, однако основным назначением фоторезистов является создание различных твердых структур заданной конфигурации [2].

Рассматривая процесс создания плоских структур, фоторезисты можно разделить на два типа – негативные и позитивные (*рис. 1*).

При использовании негативного фоторезиста изменяют свои свойства освещенные участки: в результате фотополимеризации они затвердевают и изменяют свои свойства таким образом, что становятся невосприимчивыми к последующей обработке образца кислотами или щелочами для удаления лишних остатков фоторезиста. Таким образом, при использовании фотошаблона для создания плоской структуры из негативного фоторезиста, на подложке останется только та часть полимера, которая находилась под прозрачной частью фотошаблона и была освещена, то есть полученная структура будет представлять собой негативное изображение, представленное на фотошаблоне (*рис. 1, справа*).

Соответственно, при использовании фотошаблона для создания плоской структуры из позитивного фоторезиста, после облучения он изменит свои свойства таким образом, что на подложке останется позитивное изображение элементов фотошаблона (*рис. 1, слева*).

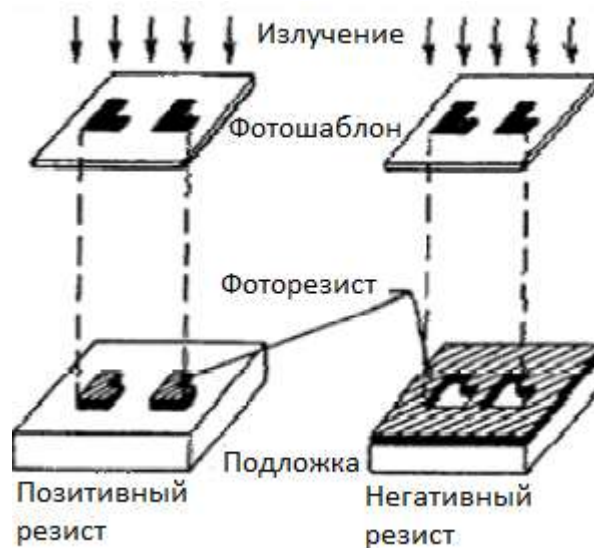


Рисунок 1 – Позитивный (слева) и негативный (справа) фоторезист [2]

Однако, как было отмечено ранее, такое деление применимо только к плоским структурам. Для создания объемных структур используются исключительно негативные фоторезисты, поскольку необходимо создание структуры по ходу лазерного луча.

Зачастую фоторезисты рассматривают по четырем основным свойствам: светочувствительность, разрешающая способность, устойчивость к химическому воздействию и равномерность фоторезистивного покрытия [3]:

- 1) Светочувствительность фоторезиста – величина, обратная количеству поглощенной световой энергии, которая необходима для получения определенного эффекта в данном фоторезисте – потеря (для негативного) или приобретение (для позитивного) растворимости облученного участка. Определяется как $S=1/H$, где S – светочувствительность, H – экспозиция. Физический смысл светочувствительности фоторезиста заключается в том, что, чем меньше необходима экспозиция для изменения свойств данного полимера, тем более светочувствительным он является.
- 2) Разрешающая способность фоторезиста – максимально возможное число отдельно передаваемых одинаковых элементов (линий) получаемого узора на 1 мм поверхности подложки. Определяется как $R=1000/(2 \cdot l)$, где R –

разрешающая способность (линий/мм), l – ширина отдельно передаваемого элемента (мкм). Во время работы с фоторезистом, свое влияние также вносят дифракция, интерференция, рассеяние и отражение света от подложки, ухудшая итоговую разрешающую способность.

- 3) Устойчивость к химическим воздействиям. Фоторезисты должны иметь высокую устойчивость к воздействию различных кислот и щелочей, поскольку в процессе травления (или электролитического осаждения) полученная структура продолжительное время находится в контакте с этими агрессивными средами.
- 4) Равномерность фоторезистивного слоя во многом зависит от метода нанесения фоторезиста на подложку и условий формирования. Определяется вязкостью, плотностью и смачиваемостью подложки данным фоторезистом.

1.2. Оптические свойства плазмонных наночастиц

1.2.1. Плазмоны

Плазмоны – квазичастицы, представляющие собой колебания облака свободных электронов в металлах. По большей части плазмоны описывают оптические свойства металлов или полупроводников. Так, внешняя электромагнитная волна с частотой меньше плазмонной частоты облучаемого материала будет хорошо отражаться от него, поскольку электронное облако этого материала может колебаться с той же частотой и тем самым экранировать эту волну. Однако, если частота электромагнитной волны будет выше плазмонной частоты материала, то электронное облако будет не в состоянии принять ту же частоту колебаний и эта волна сможет проникнуть в материал, пройдя сквозь него или поглотившись им в дальнейшем [4].

Большинство благородных металлов обладают плазмонными частотами в ультрафиолетовой области, при этом хорошо отражая излучение во всем видимом диапазоне, что и делает их блестящими и бесцветными. Однако,

например, золото или медь обладают вполне определенным цветом, поскольку их электронные переходы находятся в видимом участке спектра. На золоте и меди свет того же диапазона поглощается сильнее, чем на других металлах, из-за чего они и выглядят окрашенными.

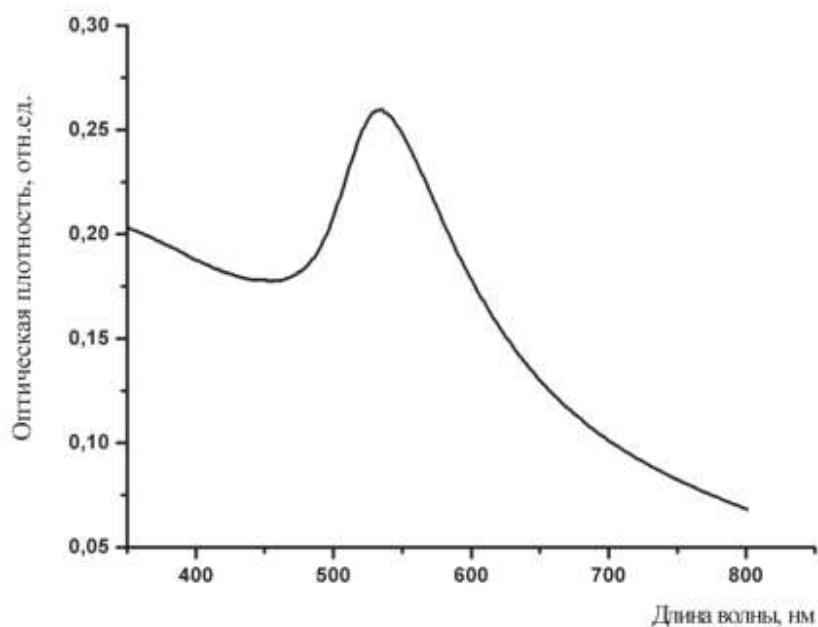


Рисунок 2 – Спектр поглощения коллоидного раствора золота [5]

Полупроводники зачастую обладают плазмонной частотой валентных электронов в дальней ультрафиолетовой области, но, в то же время, межуровневые переходы могут находиться вровень с энергией фотона видимой области. Полупроводник с такими характеристиками будет селективно поглощать некоторые видимые частоты, оставаясь при этом цветным [6]. А полупроводник в форме наночастицы будет обладать плазмонной частотой в ближней или средней инфракрасной области.

Для описания плазмонов можно воспользоваться и подходом классической физики. При таком рассмотрении, свободные электроны в металле представляются как полностью состоящая из электронов жидкость и очень высокой плотностью, то есть – плазма. Колебания плотности, появляющиеся на поверхности этой жидкости, и будут называться плазмонами или поверхностными плазмонами. Каждый из плазмонов будет представлять

собой некое дискретное значение колеблющейся плазмонной волны, что значит, что большинство свойств плазмонов можно вывести напрямую из уравнений Максвелла.

Рассматривая модель почти свободных электронов, энергию плазмона можно найти как:

$$E_p = \hbar\omega_p = \hbar e \sqrt{\frac{n}{m\varepsilon_0}},$$

где n – плотность валентных электронов, e – элементарный заряд, m – масса электрона, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

1.2.2. Поверхностный плазмонный резонанс

Такое явление как плазмонный резонанс получило широкое распространение в химии, физике и материаловедении за счет большого количества вариантов способов применения, в том числе хранение данных, биомедицинские технологии, наноэлектроника, оптические измерения. Становясь все более популярным, плазмонный резонанс стал предметом большого количество исследований, чтобы как можно лучше разобраться в его особенностях и увеличить его вклад в потенциальные области применения.

Поверхностный плазмонный резонанс, по сути, является неким электромагнитным откликом, который возникает в момент колебания плазмонов на поверхности материала с одинаковой частотой. Поскольку колебания происходят на определенных резонансных частотах, эти плазмоны движутся с периодическими движущими силами, которые, при их взаимодействии, могут стать колебаниями большой амплитуды. Но это явление невозможно само по себе, поэтому происходит оно под действием падающего света. Частота падения возбуждающих электромагнитных волн должна быть равна собственной частоте материала, в противном же случае резонанса не произойдет. Колебания распространяются на границе материал-воздух по поверхности материала и перемещаются в направлении поверхности

с отрицательной диэлектрической проницаемостью материала. Так как плазмоны находятся непосредственно на границе, то они чувствительны к изменениям внешних возбуждающих факторов, например, поглощению энергии материалом. Существует две наиболее популярные схемы, позволяющие возбудить поверхностный плазмонный резонанс: схема Отто и схема Кретчмана (рис. 3) [7].

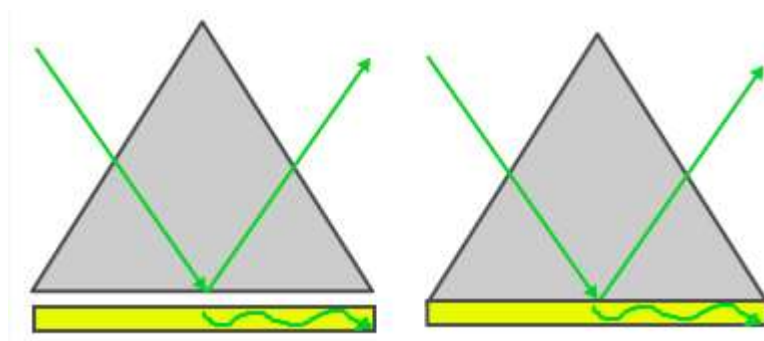


Рисунок 3 – Схема Отто (слева) и схема Кретчмана (справа) [7]

Схема Кретчмана (рис. XXX, справа) характеризуется тем, что слой металла (зачастую золото (Au), серебро (Ag), медь (Cu)) наносится при помощи испарения непосредственно на грань стеклянного блока. Сам слой при этом получается очень тонким (несколько десятков нанометров), а плазмонная волна возбуждается на границе раздела металла и окружающего пространства [8]. Схема Отто отличается тем, что слой металла прижимается к поверхности стеклянного блока, тем самым оставляя между призмой и металлом тонкий слой диэлектрика (воздуха), который обладает показателем преломления меньше, чем у стеклянного блока, а плазмонная волна возбуждается на границе металла и получившегося слоя диэлектрика. В такой схеме принципиально важна толщина получившегося диэлектрического слоя (100-250 нм), в то время как слой металла может быть любой толщины (более 20 нм) [9].

Наночастицы привлекают к себе много внимания по множеству причин, включая большое значение отношения площади поверхности наночастицы к ее объему, что заставляет ее быстро реагировать на внешние

раздражители. Кроме того, интерес к себе наночастицы вызывают и тем, что они действуют в масштабе квантовой механики; большинство различных биологических процессов происходит на наноуровне – на уровне наночастиц. Понимание принципа работы наночастиц может помочь исследователям научиться манипулировать свойствами наночастиц и достигать новых результатов.

Но одним из самых важных и интересных свойств наночастиц является их способность к проявлению поверхностного плазмонного резонанса. Когда электрические поля света направлены на наночастицы, происходит возбуждение поверхностных плазмонов и их резонанс. Кроме того, это поле также приводит к разделению зарядов, что в дальнейшем приводит к проявлению дипольного эффекта и формирует дипольное колебание в направлении электрического поля падающего света (рис. 4). За счет совпадения частот, ППР обеспечивает сильное поглощение и рассеяние падающего света, что можно измерить при помощи UV-Vis спектрометра.

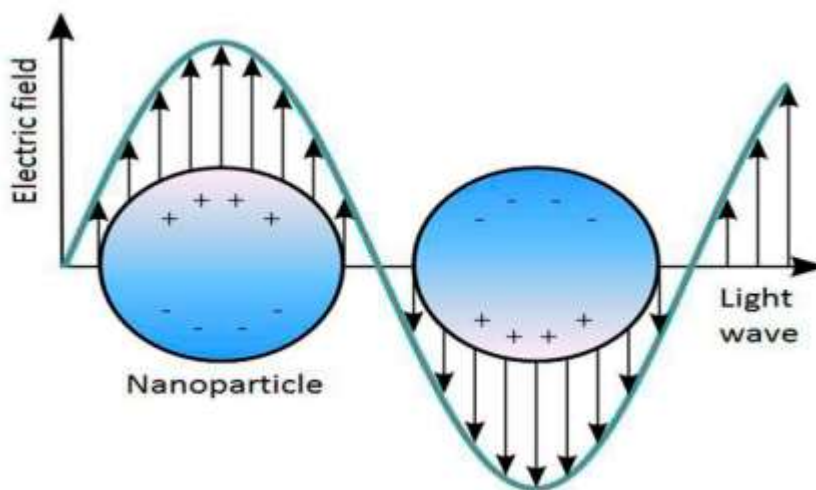


Рисунок 4 – Схематическое представление плазмонного колебания для сферической частицы [10]

Интенсивность участка ППР и резонансная длина волны зависят от многих параметров частицы, включая форму, структуру, материал, размер, параметры окружающей среды. Наибольшей интенсивностью ППР обладают

благородные металлы – платина (Pt), золото (Au), серебро (Ag), однако раньше часто использовалась и медь (Cu). Зачастую используется именно золото (Au) ввиду его биосовместимости и инертности, хотя серебро (Ag) обладает ППР большей интенсивности с более острыми пиками. На наноуровне ППР работает наиболее эффективно и может наблюдаться при помощи спектроскопии [11].

1.2.3. Локализованный поверхностный плазмонный резонанс

Если поверхностный плазмон ограничен частицей, размеры которой сопоставимы с длиной волны света – наночастицей – и свободные электроны этой частицы совершают коллективные колебания, то такой плазмон называется локализованным поверхностным плазмоном. ЛПП обладает двумя важными свойствами. Во-первых, электрическое поле вблизи поверхности частицы многократно усиливается. Усиление является наибольшим непосредственно на поверхности частицы и быстро затухает при удалении от нее. Во-вторых, экстинкция такой частицы имеет максимальное значение на частоте плазмонного резонанса, которая находится на длинах волн видимого диапазона для наночастиц благородных металлов. Максимум экстинкции зависит от показателя преломления окружающей частицу среды и является основой для методов оптического зондирования. Для более глубокого понимания локализованного поверхностного плазмонного резонанса необходимо обратиться к теории рассеяния света.

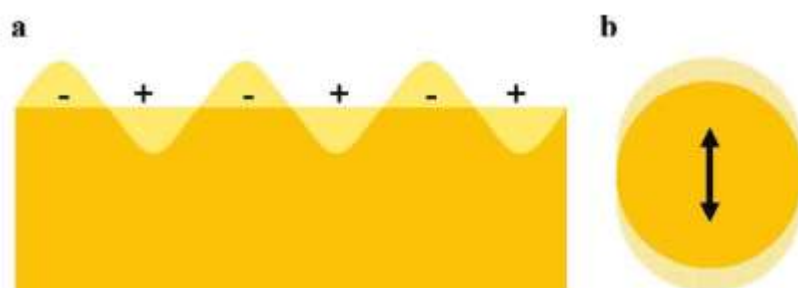


Рисунок 5 – Изображение поверхностного плазмона (а) и локализованного поверхностного плазмона (б) [12]

В 1908, Густав Ми объяснил этот феномен при помощи решения уравнений Максвелла для поглощения и рассеяния электромагнитного излучения сферическими металлическими частицами. В дальнейшем его теория была использована для расчета спектра частиц, меньших по размеру, чем длина волны падающего света. В формулировке Ми, экстинкция (сумма рассеяния и поглощения) сферической металлической наночастицы связана со свойствами системы следующим уравнением [13]:

$$E(\lambda) = \frac{24\pi N_A a^3 \varepsilon_m^{\frac{3}{2}}}{\lambda \ln(10)} \left[\frac{\varepsilon_i}{(\varepsilon_r + \chi \varepsilon_m)^2 + \varepsilon_i^2} \right],$$

где N_A – плотность наночастицы по площади, a – радиус наночастицы, ε_m – диэлектрическая постоянная окружающей среды, λ – длина волны падающего света, ε_i – мнимая часть диэлектрической постоянной наночастицы, ε_r – реальная часть диэлектрической постоянной наночастицы, χ – константа, описывающая отношение сторон наночастицы (для сферы $\chi=2$).

Исходя из этого уравнения, можно заметить, что спектр ЛППР для сферической металлической наночастицы напрямую зависит от радиуса наночастицы (a), свойств материала наночастицы (ε_i и ε_r), формы наночастицы (χ) и диэлектрической постоянной окружающей среды (ε_m).

Понимание механизмов локального усиления электрического поля за счет ЛППР привело к разработке новых методов спектроскопии и модификации старых, в том числе появились поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия (от англ. SERS – surface-enhanced Raman spectroscopy) и усиленная наконечником Рамановская спектроскопия (от англ. TERS – tip-enhanced Raman spectroscopy).

1.3. Оптические свойства фотонных кристаллов

1.3.1. Фотонные кристаллы

Фотонным кристаллом называется упорядоченная структура, главной характеристикой которой является периодическое изменение коэффициента

преломления на сопоставимом с длинами волн видимого (ближнего ИК) диапазона масштабе [14].

По тому, как именно изменяется коэффициент преломления, все фотонные кристаллы можно разделить на три группы: одномерные, двумерные и трехмерные [15].

- 1) Одномерные фотонные кристаллы. Коэффициент преломления в них изменяется периодически в одном направлении (*рис. 6*). Такие структуры состоят из нескольких слоев материалов с разными коэффициентами преломления.



Рисунок 6 – Одномерный фотонный кристалл [16]

В простейшем случае одномерный фотонный кристалл состоит из слоев двух последовательно чередующихся материалов с различными показателями преломления. Так, при монохроматическом свете длины волны λ , падающем на такую структуру нормально, для достижения эффективного отражения (попадания данной длины волны в диапазон запрещенной фотонной зоны), необходимо выполнения условия Брэгга: $2 \cdot \Lambda = m \cdot \lambda$, где Λ – период данного фотонного кристалла, m – целое число. Зачастую толщины каждого слоя принимаются равными четверти длины рабочей волны.

- 2) В двумерных фотонных кристаллах коэффициент преломления изменяется периодически в двух направлениях (*рис. 7*). Форма областей с отличным от среды коэффициентом преломления не обязательно прямоугольная (как и

кристаллическая решетка, в которой упорядочены такие области, не обязательно кубическая).

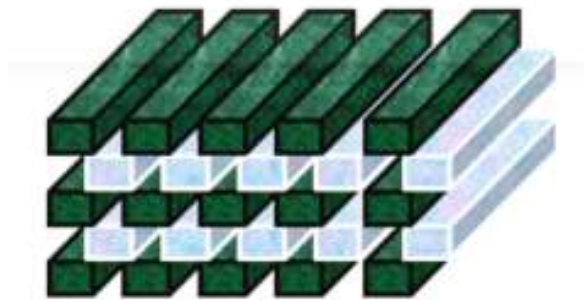


Рисунок 7 – Двумерный фотонный кристалл [16]

- 3) По аналогии с вышеперечисленным, в трехмерных фотонных кристаллах коэффициент преломления изменяется в трех направлениях (рис. 8). Эти структуры способны проявлять свои свойства как одном или двух направлениях, так и сразу во всех. Такие фотонные кристаллы можно представить массивом объемных элементов (куб, сфера и т.п.), которые упорядочены в трехмерной кристаллической решетке. Наиболее популярным примером трехмерного фотонного кристалла может служить структура опала [17].



Рисунок 8 – Трехмерный фотонный кристалл [16]

1.3.2. Фотонная зонная структура

Фотонные кристаллы обладают характерной им отличительной чертой – наличием фотонной запрещенной и фотонной разрешенной зон. Подобно запрещенным и разрешенным энергетическим зонам в полупроводниках, в фотонных кристаллах эти зоны возникают именно за счет периодического

изменения коэффициента преломления. На практике же это значит, что если фотонный кристалл облучить фотоном с энергией, лежащей в пределах запрещенной фотонной зоны этого кристалла, то такой фотон отразится обратно, поскольку не сможет проникнуть внутрь кристалла и распространяться там [18].

Параметры запрещенных фотонных зон кристалла (положение и ширина) напрямую зависят от параметров конкретного фотонного кристалла, в том числе от его формы, размерности и присутствующих в этом кристалле коэффициентов преломления. В связи с этим возможна перестройка запрещенных фотонных зон путем изменения формы областей с отличным от среды коэффициентов преломления или же путем изменения самих коэффициентов преломления при воздействии на них внешними полями.

Ширина запрещенной зоны фотонного кристалла прямо влияет на возможность его использования. В основном выделяют две крупные группы: проводники (*рис. 9, слева*) или изоляторы (*рис. 9, справа*) [18]. Фотонные проводники характеризуются большой шириной разрешенных фотонных зон. Такие фотонные кристаллы представляют собой прозрачные структуры, где свет может преодолевать большие расстояния, при этом практически не поглощаясь. В свою очередь, изоляторы наоборот характеризуются широкими запрещенными фотонными зонами. Ярким примером таких фотонных изоляторов могут служить многослойные диэлектрические зеркала.

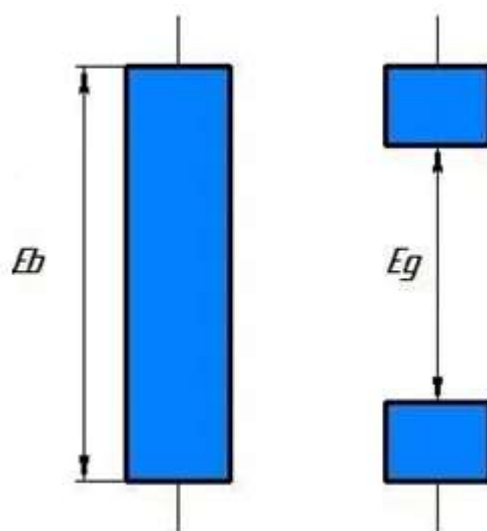


Рисунок 9 – Схематическое представление фотонного проводника (слева) и изолятора (справа); E_b – разрешенная фотонная зона, E_g – запрещенная фотонная зона [18]

1.3.3. Дефекты структуры фотонного кристалла

Любая неоднородность фотонного кристалла является дефектом его структуры и способна кардинально изменить его свойства и способы применения. Так, искусственно создавая точечные дефекты в структуре фотонного кристалла, можно ловить фотоны, энергия которых находилась в области разрешенной фотонной зоны, в «ловушки» (точечные дефекты), где эта же энергия будет находиться уже в запрещенной зоне, а затем использовать их [19].

Так, если в трехмерном фотонном кристалле создать систему связанных между собой дефектов, то тем самым можно сформировать волновод со сложной геометрией. Кроме того, искусственно размещенные в структуре фотонного кристалла дефекты, можно использовать как волноводы, способные повернуть ход луча практически без потерь. В этом случае для прохождения луча создаются уже не точечные, а линейные дефекты. Чтобы повернуть луч на 90° достаточно разместить в структуре ФК два соединенных под прямым углом линейных дефекта путем удаления ряда стержней на предполагаемом пути прохождения луча [20].

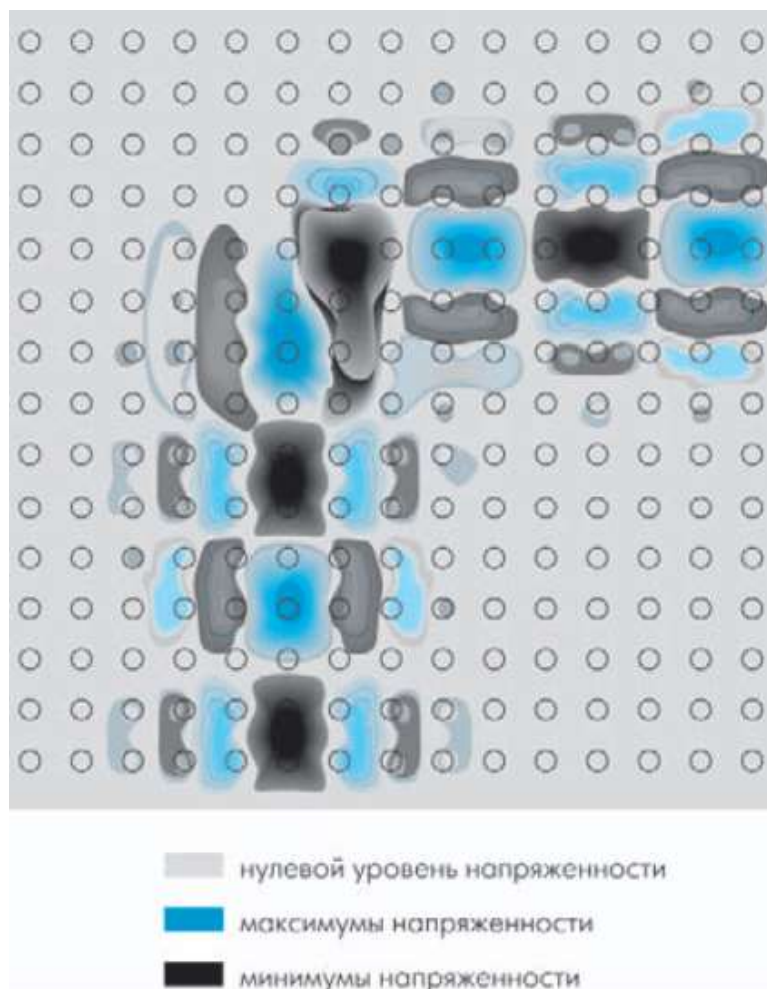


Рисунок 10 – Схема поворота оптического луча на 90° [20]

1.4. Спектроскопические методы исследования

1.4.1. Рамановская спектроскопия

Рамановская спектроскопия – спектроскопический метод, обычно используемый для опознавания молекул, путем определения их колебательных мод. Свою популярность этот метод приобрел за счет отличной химической специфичности, поскольку спектр каждой молекулы индивидуален, а данный метод спектроскопии обеспечивает снятие этого спектра, подобно «отпечатку пальца» молекулы [21].

Основной характеристикой Рамановской спектроскопии является неупругое рассеяние фотонов, известное как комбинационное рассеяние. Источником монохроматического света выступает лазер с длинами волн в диапазоне от УФ до ИК области. Взаимодействие лазерного излучения с

молекулярными вибрациями приводит к сдвигу энергий фотонов вверх или вниз. Эти энергетические сдвиги и дает информацию об исследуемом материале за счет опознавания этих сдвигов. Кроме того, дополнительная информация об исследуемом материале может получена при помощи ИК-спектроскопии.

Зачастую в Рамановской спектроскопии используется зеленый (532 нм) или ближний ИК (785 нм) лазеры с возможностью достижения разрешающей способности вплоть до 250-350 нм. Эти значения аналогичны разрешению, которое можно достичь при использовании флуоресцентной визуализации.

Некоторая часть лазерного излучения, которая теряет энергию после возбуждения колебаний в молекулах, смещается за счет этого в область меньшей энергии. Это излучение в дальнейшем и проходит через спектрометр, который записывает спектр образца при помощи охлажденной ПЗС-матрицы. Схематичное представление Рамановского спектроскопа изображено ниже на рисунке 11.

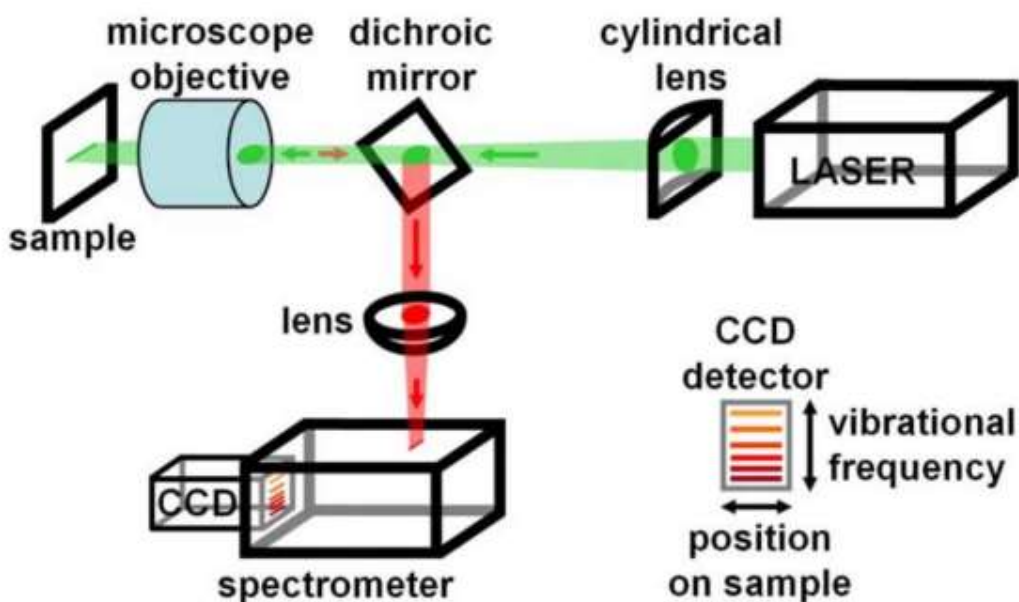


Рисунок 11 – Схематичное представление Рамановского спектроскопа [21]

По сути, комбинационное рассеяние можно представить, как некий двухфотонный процесс. Молекула исследуемого вещества поглощает

падающий на нее фотон $h\nu_i$ и в результате этого возбуждается до виртуального энергетического уровня. После этого молекула возбуждается и испускает неупруго рассеянный фотон $h\nu_s$, энергия которого отличается от энергии фотона $h\nu_i$.

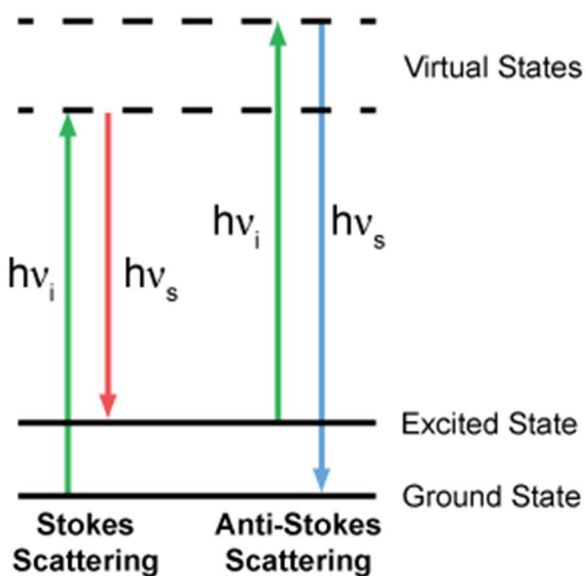


Рисунок 12 – Рамановское рассеяние [22]

1.4.2. Поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия

Поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия – это высокочувствительный и универсальный метод анализа исследуемых веществ, наиболее часто применяемый в различных биосенсорных приложениях. Принцип работы этого метода аналогичен обычной Рамановской спектроскопии, но является лучшей его заменой ввиду большей чувствительности. Повышение чувствительности достигается за счет модификации поверхности, на которой расположен исследуемый образец. Но, к сожалению, механизм усиления сигнала в данном методе не изучен достаточно хорошо и может сильно зависеть от комбинации исследуемого вещества и используемой SERS-подложки. Схематичное представление принципа действия поверхностно-усиленной Рамановской спектроскопии и сравнение с принципом действия обычной Рамановской спектроскопии изображено на рисунке 13 [23].

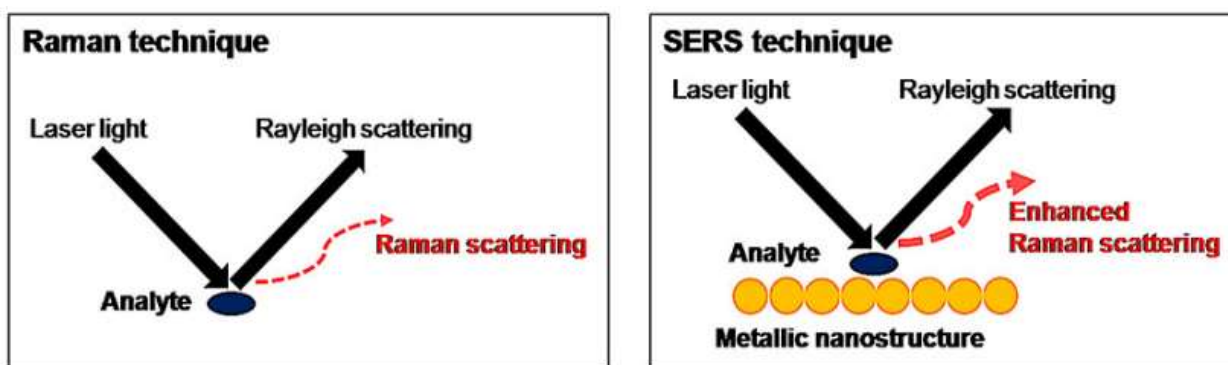


Рисунок 13 – Принцип действия RS (слева) и SERS (справа) [23]

Как можно заметить, SERS требует наличия металлических наноструктур в составе исследуемого образца. Именно поэтому для лучшего понимания SERS механизма необходимо рассмотреть не только взаимодействие между светом и исследуемым образцом, но и между светом и используемыми металлическими наноструктурами. Оптические свойства таких структур и являются, по сути, основным предметом изучения плазмоники.

Теоретически было описано и выделено два основных механизма, которые могут поспособствовать в понимании механизмов SERS: электромагнитное усиление и химическое усиление. Так, электромагнитный механизм показывает увеличение интенсивности сигнала на 4-11 порядков, в то время как химический механизм лишь в 10-100 раз. На данный момент физическая основа электромагнитного механизма усиления относительно ясна, что помогло успешно использовать SERS для обеспечения большей чувствительности [24].

Механизм электромагнитного усиления

Как было сказано ранее, SERS сочетает в себе взаимодействие света как с исследуемым материалом, так и с металлической подложкой. Когда возбуждающая электромагнитная волна распространяется на границе раздела металл-диэлектрик, она может заставить электроны металлической структуры испытывать коллективные колебания. В тот момент, когда частота падающего

лазерного луча совпадает с частотой этих коллективных колебаний, можно наблюдать явление поверхностного плазмонного резонанса. Резонансная частота для конкретной подложки будет разной и зависит от размера, формы, параметров материала и т.д. В металлических наноструктурах ЛППР может быть локализован в определенной части этой структуры, такой эффект будет носить название локализованного поверхностного плазмонного резонанса. Металлические наноструктуры, способные к генерации ЛППР называются плазмонными наночастицами и зачастую представляют собой серебро (Ag), золото (Au), медь (Cu), поскольку эти металлы демонстрируют сильный эффект ЛППР в видимой и ближней инфракрасной областях [24].

Процессы, происходящие при SERS (*рис. 14*), можно рассмотреть, как двухэтапный механизм усиления сигнала. На первом этапе происходит усиление окружающего наночастицы ближнего поля (как приемной оптической антенны) на возбуждающей волне. На втором этапе наночастицы выступают в качестве передающих оптических антенн для передачи Рамановского сигнала из ближнего поля в дальнее поле. В этом случае Рамановский сигнал пропорционален усиленному локальному электрическому полю на длине волны Рамановского рассеяния. Таким образом, суммарное SERS усиление равно отношению возбужденного ближнего электрического поля наночастицы к электрическому полю падающего света [24]:

$$R = \frac{|E_{loc}|^4}{|E_0|^4}$$

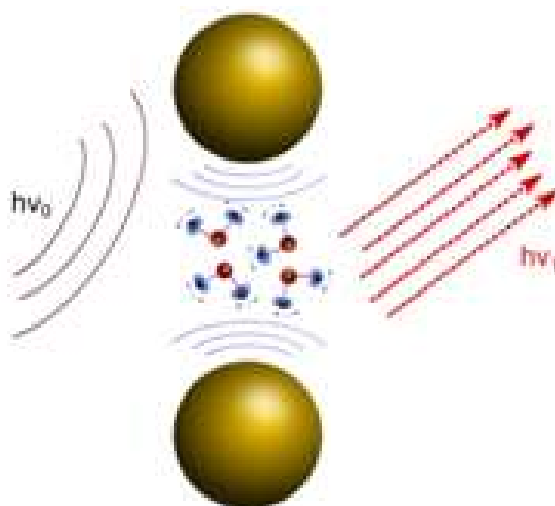


Рисунок 14 – Схематичное представление механизма электромагнитного усиления

Горячие точки

Сама по себе единичная плазмонная наночастица не способна обеспечить достаточное усиление Рамановского сигнала, однако, если хотя бы две таких частицы расположены на достаточно малом расстоянии друг от друга, то такая система может дать гораздо большее усиление. В области, где расстояние между поверхностями двух металлических наночастиц минимально, происходит максимальное уплотнение линий электрического поля. Такая область и называется горячей точкой [25].

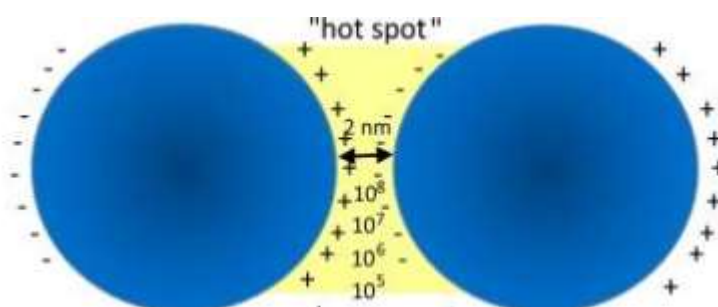


Рисунок 15 – Схематичное представление горячей точки [25]

2. Объекты и методы исследования

Целью представленной работы является исследование оптических свойств трехмерных плазмонных структур, изготовленных методом двухфотонной полимеризации, и проверка возможности использования таких структур в качестве усиливающей SERS-подложки. Исследование проводилось с использованием различных спектроскопических методов, таких как Рамановская спектроскопия и поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия, и создание физической 3D модели для более полного понимания происходящих процессов.

2.1. Объекты исследования

Основными объектами исследования в данной работе являются: полимерная структура типа «поленница» с осажденными по объему золотыми наночастицами с добавлением кристаллов 4-NBT, структура типа «поленница» с осажденными по объему наночастицами без добавления кристаллов 4-NBT и кремниевые подложки с осажденными по поверхности кристаллами 4-NBT.

1. «Поленница» с добавлением кристаллов 4-NBT

Здесь кристаллы 4-NBT выступают исследуемыми образцами, а представленная структура служит усиливающей подложкой.

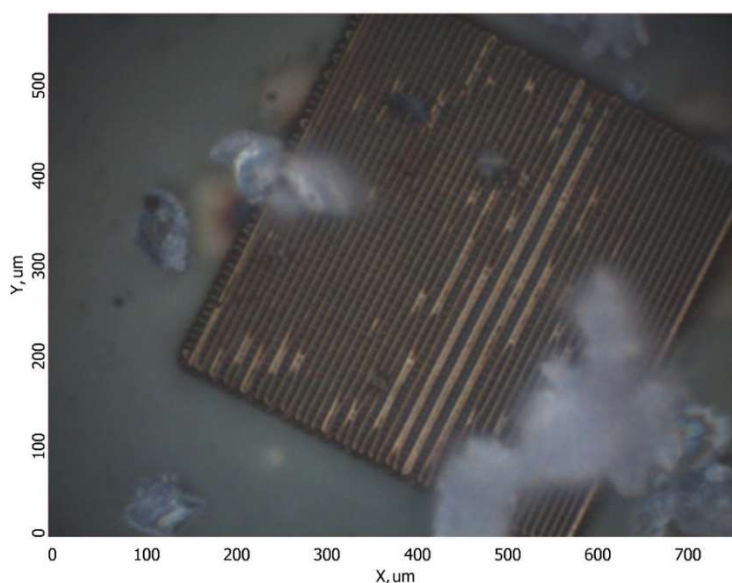


Рисунок 16 – Оптическое изображение структуры типа «поленица» с осажденными кристаллами 4-NBT

2. «Поленица» без кристаллов 4-NBT

Измерение сигнала от «поленицы» без осажденных кристаллов 4-NBT проводилось для опознавания собственного сигнала этой структуры с целью последующего сопоставления полученных результатов.

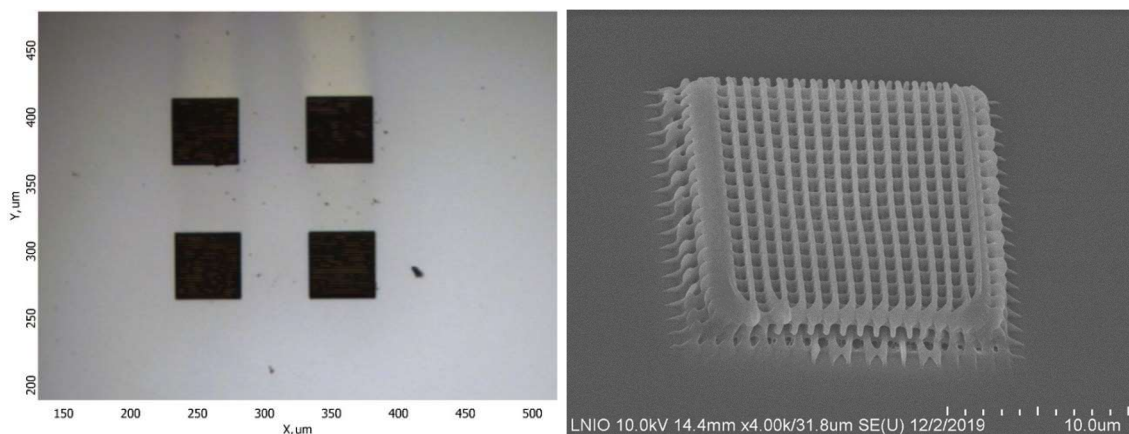


Рисунок 17 – Оптическое (слева) и SEM (справа) изображения структуры типа «поленица»

3. Кремниевые подложки с осажденными кристаллами 4-NBT

Измерение сигнала от кремниевых подложек с осажденными кристаллами 4-NBT проводилось для опознавания собственного сигнала этих кристаллов с целью последующего сопоставления полученных результатов.

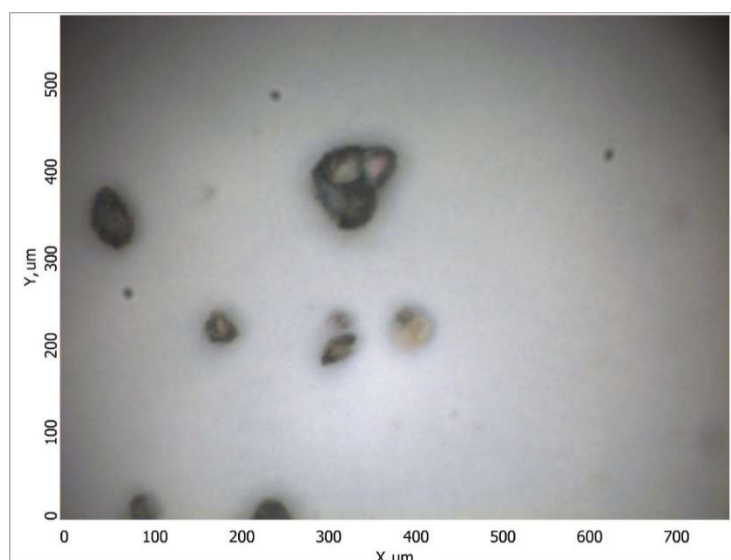


Рисунок 18 – Оптическое изображение кристаллов 4-NBT, осажденных на кремниевой подложке

2.2. Метод конечных элементов в COMSOL Multiphysics

Для предварительного расчета и исследования оптических параметров используемых материалов (в том числе, спектры поглощения золотых наночастиц) были созданы 3D-модели рассеяния электромагнитных волн при помощи программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Это ПО, используя метод конечных элементов, позволяет решать волновое уравнение Максвелла для каждой конкретной точки построенной 3D модели, «разбитой» на сетку. Лазерный луч при расчетах был задан как плоская электромагнитная волна с напряженностью электрического поля $E=1$ В/м.

Для расчетов было создано две модели: сферическая металлическая наночастица (рис. 19, слева) и уменьшенная модель микроструктуры типа «поленница» (рис. 19, справа).

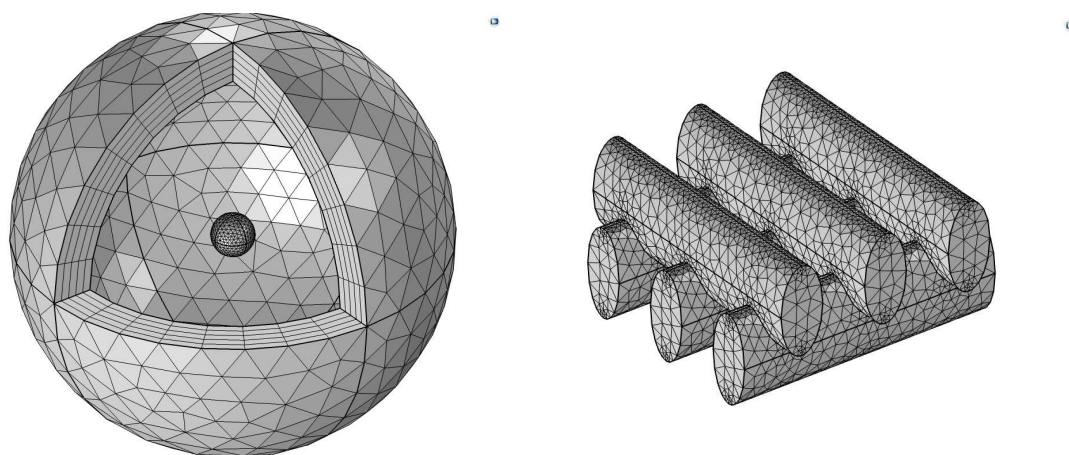


Рисунок 19 – Модели сферической наночастицы (слева) и уменьшенной структуры «поленница» (справа), созданных при помощи COMSOL Multiphysics

Рассеяние электромагнитной волны на сферической частице является хорошо известным и изученным процессом, поэтому расчеты физической модели проводились для того чтобы понять, насколько близкие результаты к известным можно получить. Для расчета физической модели использовался

диапазон длин волн от 300 до 900 нм с шагом в 5 нм. Материалом сферической наночастицы было выбрано золото «Au (Johnson and Christy 1972)». Данный материал является базовым и доступен в библиотеке материалов COMSOL Multiphysics. Радиус сферической наночастицы 10 нм. Для задания граничных условий, вокруг наночастицы построена еще одна сфера большего радиуса (рис. 19, слева).

После расчета и анализа полученных результатов рассеяния электромагнитной волны на сферической наночастице был произведен расчет взаимодействия электромагнитной волны с микроструктурой типа «поленница» (рис. 19, справа). Здесь для расчета использовались три определенных длины волны: 532 нм (зеленый лазер), 633 нм (красный лазер) и 785 нм (ближний ИК лазер). Материал данной структуры не является базовым и был задан вручную по известной кривой полного коэффициента преломления использованного полимера (рис. 20). Поскольку данная модель является уменьшенной, ее размеры составляют 3х3х1,5 мкм. Для задания граничных условий, вокруг «поленницы» был построен куб большего размера.

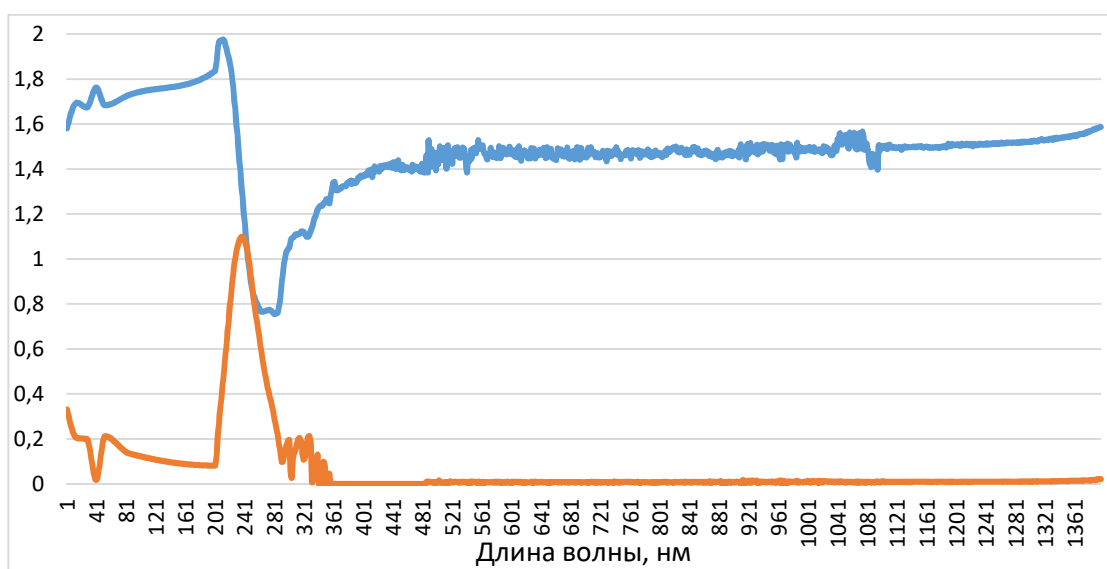


Рисунок 20 – Кривая полного коэффициента преломления использованного полимера. Синий график – реальная часть коэффициента преломления (n), красный график – мнимая часть коэффициента преломления (k)

2.3. Методы экспериментального исследования

Для исследования свойств и возможности использования структуры типа «поленница» в качестве SERS-подложки была использована поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия с использованием трех разных лазеров: зеленого (532 нм), красного (633 нм) и ближнего ИК (785 нм). Согласно литературным данным [6] и рассчитанным моделям (рис. 23), золотые сферические наночастицы имеют спектр поглощательной способности с пиком в зеленой области. Исходя из этого, можно заранее предположить, что наибольшее усиление сигнала от молекул 4-NBT за счет исследуемой подложки будет достигаться при использовании зеленого (532 нм) лазера, а при использовании ИК (785 нм) лазера, соответственно, ожидается наименьшее усиление.

Для измерения на красном (633 нм) и ИК (785 нм) лазерах использовался стационарный модуль спектроскопии комбинационного рассеяния NTEGRA [26]. Для оптического обнаружения исследуемого образца использовались объективы x100 и x10. Для считывания сигнала использовалась ПЗС-матрица (1024x255 пикселей) с размером чувствительной области 27x6 мм.



Рисунок 21 – Модуль спектроскопии комбинационного рассеяния NTEGRA [26]

Для измерения на зеленом (532 нм) лазере использовался портативный лазерный Рамановский спектрометр Confotec Duo [27].



Рисунок 22 – Портативный лазерный Рамановский спектрометр Confotec Duo [27]

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Представленная работа посвящена исследованию оптических свойств трехмерных плазмонных структур с целью изучения их последующего использования, в том числе, в качестве усиливающих подложек для поверхностно-усиленной Рамановской спектроскопии.

Основной целью данного раздела является оценка конкурентоспособности, ресурсоэффективности, ресурсосбережения и финансовых затрат в отношении представленной исследовательской работы. Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

- Анализ потенциальных конкурентных решений;
- SWOT-анализ и составление SWOT матрицы проекта;
- Определение плана проведения научно-исследовательских работ;
- Расчет бюджета научного исследования.

4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1. Анализ конкурентных технических решений

Проведение анализа конкурентных технических решений позволяет оценить сравнительную эффективность представленной научной разработки с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Для наиболее полного раскрытия этого вопроса, целесообразно использовать оценочную карту.

Основными методами проведения исследований в данной работе являлась поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия (SERS) и компьютерное моделирование отдельных объектов при помощи коммерческого программного обеспечения COMSOL Multiphysics – Бф. В

качестве конкурентных методов исследования можно использовать: ультрафиолетовую-видимую спектроскопию (UV/VIS) – B_{K1} , инфракрасную спектроскопию – B_{K2} . Оценка производится по каждому критерию по пятибалльной шкале. Итоговая сумма весов всех критериев должна равняться единице.

Анализ конкурентных решений производится по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента, B_i – вес показателя в долях, B_i – балл показателя.

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
	B_i	B_{Φ}	B_{K1}	B_{K2}	K_{Φ}	K_{K1}	K_{K2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Надежность	0,2	4	3	4	0,8	0,6	0,8
Безопасность	0,2	4	4	4	0,8	0,8	0,8
Функционал	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
Точность измерений	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
Экономические критерии оценки эффективности							
Стоимость оборудования	0,1	3	4	4	0,3	0,4	0,4
Уровень проникновения на рынок научных исследований	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Перспективность метода	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Итого	1	30	26	28	4,3	3,7	4,0

По итогам анализа конкурентных технических решений можно заметить, что использованный в данной исследовательской работе метод является наиболее эффективным с преимуществом в большинстве критериев, за исключением цены оборудования.

4.1.2. SWOT анализ

SWOT-анализ работы является одним из инструментов оценки эффективности проекта с целью определения его сильных и слабых сторон. Данный анализ применяется для исследования как внутренней, так и внешней среды проекта.

Таблица 2 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Полученные при использовании метода SERS результаты являются достоверными и точными.</p> <p>С2. Метод SERS позволяет получить больше информации об исследуемом веществе.</p> <p>С3. Оборудование, используемое для SERS не ограничено этим и может быть использовано для проведения исследований другими методами.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Высокая цена используемого оборудования</p> <p>Сл2. Для самостоятельного доступа к оборудованию необходимо получение специального допуска.</p> <p>Сл3. Используемое оборудование пользуется большим спросом и постоянно занято другими сотрудниками.</p> <p>Сл4. Многие материалы изготавливаются не в Томске.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Возможность одновременного проведения нескольких различных исследований над одним веществом.</p> <p>В2. Возможность полного контроля используемых при проведении эксперимента параметров.</p> <p>В3. Эксперименты, проведенные при помощи SERS могут быть легко воспроизведены при расчетах физических моделей.</p>	<p>К проводимым исследованиям при помощи метода SERS, можно добавить, например, методы атомно-силовой микроскопии для одновременного снятия с исследуемых образцов как карту распределения интенсивности ответного сигнала, так и топографическую карту исследуемой зоны, что позволит получить гораздо больше информации.</p>	<p>Само оборудование, как и большинство используемых для исследования материалов, являются дорогостоящими. Однако данные, получаемые в процессе исследования, при их правильной обработке могут быть легко воспроизведены на любой похожей технике.</p> <p>Несмотря на постоянную занятость техники, работа на ней не застывает на месте, поскольку для этого организован специальный календарь.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Незапланированные расходы, связанные с неисправным или поврежденным оборудованием.</p>	<p>При снятии и сохранении полученных данных с оборудования необходимо проверять формат сохраняемого документа, иначе обработка данных может быть сильно</p>	<p>Для получения точных и достоверных результатов необходимо затратить большое количество времени, в том числе для получения допуска к самостоятельной работе на оборудовании, что может</p>

<p>У2. При повреждении оборудования большинство экспериментов могут быть «заморожены» до момента его починки.</p> <p>У3. Ввиду быстрого развития науки, возможно появление нового метода исследований, который по некоторым параметрам превзойдет используемый.</p>	<p>затруднена. В случае неправильного сохранения или обработки данных, они могут быть значительно изменены из-за чего их справедливость может сильно пострадать и привести к невозможности их точного описания.</p>	<p>сказаться на скорости получения результатов и, в случае написания статьи, может стать причиной срывов сроков подачи.</p>
---	---	---

По результатам SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны проекта, а также угрозы и возможности. Так же было выявлено то, как можно компенсировать слабые стороны проекта за счет его возможностей и нейтрализовать угрозы с помощью сильных сторон проекта. Результаты SWOT анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

4.2. Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- Определение структуры работ в рамках научного исследования;
- Определение участников каждой работы;
- Установление продолжительности работ;
- Построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и студент (в качестве инженера проекта). В данном разделе представлен список этапов работ в рамках выполнения исследовательского проекта и распределение исполнителей по видам работ.

Таблица 3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания на ВКР	Научный руководитель
Выбор направлений исследований	2	Подбор и изучение литературы по соответствующей теме	Инженер
	3	Составление плана исследования	Научный руководитель, инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Изучение методик по работе с оборудованием, необходимым для проведения исследования	Инженер
	5	Снятие Рамановских спектров с исследуемых образцов	Инженер
	6	Воссоздание компьютерных моделей проведенных экспериментов	Инженер
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ полученных результатов научно-исследовательской работы	Научный руководитель, инженер
Составление документации	8	Оформление пояснительной записки к научно-исследовательской работе	Инженер

4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть затрат составляют заработные платы, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, поскольку зависит от множества различных факторов, учесть которые сложно. Чтобы определить ожидаемое значение трудоемкости $t_{ож\ i}$ используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{min\ i} + 2 \cdot t_{max\ i}}{5},$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн., $t_{min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн., $t_{max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн., $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн., $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным способом демонстрации графика проведения работ является диаграмма Ганта. Диаграмма состоит из блоков, расположенных на двух осях: по вертикали располагаются задачи, из которых

состоит проект, а по горизонтали – время, отведенное на их выполнение. Для корректного построения диаграммы Ганта необходимо пересчитать длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней в календарные.

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях, T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях, $k_{\text{кал}}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году, $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году, $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Календарный коэффициент для шестидневной рабочей недели:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 67 - 14} = 1,28$$

Все рассчитанные значения в календарных днях округляются до целого числа и сводятся в единую таблицу.

Таблица 4 – Календарный план проекта

Название работы	Трудоемкость работы			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях
	t_{min} , чел.-дни	t_{max} , чел.-дни	$t_{\text{ожн}}$, чел.-дни		
Составление и утверждение технического задания на ВКР	1	2	1,4	Научный руководитель	2
Подбор и изучение литературы по соответствующей теме	10	20	14	Инженер	18

Составление плана исследования	3	6	4,2	Научный руководитель, инженер	3
Изучение методик по работе с оборудованием, необходимым для проведения исследования	3	5	3,8	Инженер	5
Снятие Рамановских спектров исследуемых образцов	7	10	8,2	Инженер	11
Воссоздание компьютерных моделей проведенных экспериментов	7	10	8,2	Инженер	11
Анализ полученных результатов научно-исследовательской работы	10	20	14	Научный руководитель, инженер	9
Оформление пояснительной записки к научно-исследовательской работе	20	30	24	Инженер	31
Итого:					90

Для иллюстрации календарного плана проекта построена диаграмма Ганта, которая отображает план-график проведения работ с разбивкой по месяцам и декадам, где ■ – научный руководитель, ■ – исполнитель работ по проекту.

Таблица 5 – Диаграмма Ганта

Этапы работы	Исполнители	Т _к , раб. дни	Продолжительность выполнения работ								
			Март			Апрель			Май		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
Составление и утверждение технического задания на ВКР	Научный руководитель	2	■								
Подбор и изучение литературы по соответствующей теме	Инженер	18	■	■							
Составление плана исследования	Научный руководитель, инженер	3			■						
Изучение методик по работе с оборудованием, необходимым для проведения исследования	Инженер	5			■						
Снятие Рамановских спектров с исследуемых образцов	Инженер	11			■	■					
Воссоздание компьютерных моделей проведенных экспериментов	Инженер	11				■	■				
Анализ полученных результатов научно-исследовательской работы	Научный руководитель, инженер	9					■	■			
Оформление пояснительной записки к научно-исследовательской работе	Инженер	31						■	■	■	■

4.2.4. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.2.4.1. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

При расчете затрат на специальное оборудование для проведения научных работ учитываются все затраты, связанные с приобретением специальных приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов, необходимых для проведения работ, а также затраты на приобретение необходимого программного обеспечения.

При выполнении данной научно-исследовательской работы использовался персональный компьютер Acer Aspire E15, расчет физических моделей производился при помощи коммерческого программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Экспериментальные исследования проводились при помощи оборудования Научного парка НИ ТПУ.

Амортизация рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{C}{n} \cdot t,$$

где C - первоначальная стоимость оборудования, руб., n – срок службы, t - время использования.

Все расчеты по приобретению оборудования и его амортизации приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Время исп-я, раб. дни	Срок службы, год	Цена единицы оборудования, руб.	Амортизация оборудования, руб.
1	ПЭВМ	1	90	5	40000	1973
2	Базовый пакет ПО COMSOL Multiphysics	1	20	5	126000	1381
3	Расчетный модуль COMSOL Multiphysics Electromagnetic waves	1	20	5	66500	729
4	Двухканальный спектрометр Confotec SR 120 Duo	1	2	10	2470000	1353
5	Многофункциональная автоматизированная система NTEGRA Spectra	1	1	10	7000000	1918
Итого $C_{ам}$, руб:						7354

4.2.4.2. Основная заработная плата исполнителя темы

В данной статье учитывается основная заработная плата научных работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по представленной теме: научного руководителя работы и студента-инженера. Величина расходов определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением научно-исследовательской работы и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата, $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12÷20 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя и исполнителя рассчитывается как:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн., $З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается как:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d},$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб.:

$$З_m = З_{мс} \cdot k_p,$$

где $З_{мс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб., k_p – районный коэффициент (1,3 для Томска), M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (для 6-дневной недели: при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,2$ месяца, при отпуске 48 раб. дней – $M = 10,4$ месяца), F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 7 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:	66	66
• выходные дни и праздничные дни		
Потери рабочего времени:	56	48
• отпуск и невыходы по болезни		

Действительный годовой фонд рабочего времени	243	251
--	-----	-----

Таблица 8 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{мс}$, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	40000	1,3	52000	2182,7	14	30557,8
Исполнитель	15000	1,3	19500	807,9	88	71101,2
Итого:						101659

4.2.4.3. Дополнительная заработная плата

Данная статья включает сумму выплат, предусмотренных законодательством о труде, таких как: оплата отпусков, выплата вознаграждения за выслугу лет, отклонение от нормальных условий труда и т.п.

Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,10÷0,15; примем равным 0,13).

Таблица 9 – Заработная плата исполнителей научно-исследовательской работы

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата, руб.	30557,8	71101,2
Дополнительная зарплата, руб.	3972,5	9243,2
Зарплата, руб.	34530,3	80344,4
Итого $C_{зп}$, руб.	114874,7	

4.2.4.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Здесь рассматриваются обязательные установленные законодательством РФ нормы отчисления органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды составляет 30,2% от величины компенсации трудозатрат.

Таблица 10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель	30557,8	3972,5
Исполнитель	71101,2	9243,2
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	30,2%	
Отчисления во внебюджетные фонды, руб.		
Руководитель	10428,2	
Исполнитель	24264	
Итого С _{внеб} , руб.	34692,2	

4.2.4.5. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: оплата услуг связи, электроэнергии и т.д. Их величина определяется как:

$$C_{\text{накл}} = (\text{сумма предыдущих статей}) \cdot k_{\text{нр}} = (C_{\text{ам}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{внеб}}) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (примем равным 16%).

$$C_{\text{накл}} = (7354 + 114874,7 + 34692,2) \cdot 0,16 = 25107,3 \text{ руб.}$$

4.2.4.6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 11 – Расчет бюджета научно-исследовательской работы

Наименование статьи	Сумма, руб.		Прим.
	Руководитель	Исполнитель	
1. Амортизация	7354		XXX.2.4.1.
2. Основная з/п	30557,8	71101,2	XXX.2.4.2.
3. Дополнительная з/п	3972,5	9243,2	XXX.2.4.3.
4. Отчисления во внебюджетные фонды	10428,2	24264	XXX.2.4.4.
5. Накладные расходы	25107,3		XXX.2.4.5.
Бюджет затрат научно-исследовательской работы, руб:			182028,2

4.3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки, Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения, Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки, a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки, b_i^a b_i^p — бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания, n – число параметров сравнения.

Таблица 12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Критерий	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1.Надежность	0,2	4	5
2.Безопасность	0,25	3	4
3.Помехоустойчивость	0,15	5	5

4.Энергосбережение	0,25	4	4
5.Удобство эксплуатации	0,15	4	3
Итого:	1	3,9	4,2

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p \text{ исп.1}} = 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 3,9$$

$$I_{p \text{ исп.2}} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 = 4,2$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

$I_{испi}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп.1}}{I_{финр}}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}$$

Таблица 13 – Сравнительная эффективность разработки

№ П/П	Показатель	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,0	0,997
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	3,9	4,2

3	Интегральный показатель эффективности	3,9	4,2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,93	1,0

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. В данном разделе были рассчитаны амортизационные отчисления используемого оборудования, накладные расходы, затраты на заработную плату исполнителей, отчисления во внебюджетные фонды, а также общий бюджет научного проекта. Планирование бюджета было распределено главным образом на материальные затраты, оборудование, зарплаты, а также на накладные расходы.

В результате анализа данного раздела, можно сделать следующие выводы:

1. SWOT-анализ научного исследования выявил сильные и слабые стороны научно-исследовательской работы;
2. При планировании исследования была построена ленточная диаграмма Ганта, которая позволяет скоординировать работу исполнителей в ходе выполнения исследования;
3. Примерная сумма для выполнения научно-исследовательской работы составила 180000 рублей.